ارزیابی تغییرمکان قائم کوتاه‌مدت تیرهای بتن‌آرمه با میلگردهای کامپوزیت FRP★

«یادداشت پژوهشی»

علی خیرالدین[۱] فهیمه مالکی[۲]

چکیده *یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر قابلیت بهره‌برداری سازه‌ها، تغییرمکان قائم در اعضای بتنی می‌باشد. در این مقاله تغییرمکان قائم کوتاه‌مدت تیرهای بتن‌آرمه با میلگردهای فولادی و میلگردهای کامپوزیت FRP، با مدل‌سازی در نرم‌افزار آباکوس مورد مطالعه قرار گرفت. برای انواع مختلف میلگردهای فولادی و FRP، دوازده تیر بتن‌آرمه مورد تحلیل قرار گرفت و ممان اینرسی مؤثر و تغییرمکان قائم حاصل با روابط ACI 440.1R-15 و روابط پیشنهادی سایر محققان مقایسه گردید. پس از تحلیل مشخص شد که برای جلوگیری از شکست ناگهانی تیر بتن‌آرمه با میلگرد FRP، بهتر است تیر بتنی با نسبت آرماتور بالا طراحی شود. باتوجه به نمودارهای نیرو- تغییرمکان قائم تیرهای بتنی مسلح با میلگردهای کامپوزیت FRP، استفاده از میلگردهای کامپوزیت کربن (CFRP) در محیط‌های خورنده، جایگزین مناسبی برای میلگردهای فولادی می‌باشد. با مقایسهٔ روابط مختلف مشخص شد که استفاده از روابط بیشف- گروس و بیشف- اسکانلون در تیرهای مسلح شده با میلگردهای کامپوزیت شیشه (GFRP) و آرامید (AFRP) به‌ترتیب با خطای کمتر از دو در صد و ده در صد برای تعیین تغییرمکان قائم در این تیرها مناسب می‌باشد. نتایج تحلیل بیانگر آن است که روابط پیشنهادی محققان مختلف، برای تمام انواع میلگرد FRP نتایج قابل قبولی را ارائه نمی‌نماید و برحسب میلگرد مورد استفاده باید از رابطهٔ خاصی استفاده گردد.*

واژه‌های کلیدی تیر بتن‌آرمه، روش اجزای محدود، میلگرد کامپوزیت FRP، تغییرمکان قائم.

Investigation of Short-Term Deflection in Reinforced Concrete Beams with FRP Bars

A. Kheyroddin F. Maleki

Abstract *One of the most important factors affecting the serviceability of structures is the deflection of concrete members. In this paper, short-term deflection of reinforced concrete (RC) beams with FRP and steel bars were studied by modeling in ABAQUS software. For different types of steel and FRP bars, twelve RC beams have been analyzed and the effective moment of inertia and deflection of the results were compared with the ACI 440.1R-15 and proposed equations. After analysis, it was found that to prevent sudden failure of RC beams with FRP bars, it is better to design a concrete beam with over reinforced sections. According to load-deflection curves of RC with FRP bars, the use of carbon FRP (CFRP) bars are the suitable alternative for steel bars in the corrosive environment. It is concluded that the use of Bischoff- Scanlon, and Bischoff- Gross equations in RC beams with glass FRP (GFRP) and aramid FRP (AFRP) with the error of less than 2% and 10%, respectively, are appropriate for determining deflection in these beams. Results indicate that any of the proposed relations for all different types of FRP rebar does not provide satisfactory results and in terms of used reinforcement special equations should be used.*

Key Words Reinforced Concrete Beam, Finite Element Method, FRP Bar, Deflection.

★ تاریخ دریافت مقاله ۹۶/۲/۱۰ تاریخ پذیرش آن ۹۶/۱۱/۱۶ می‌باشد.

(۱) نویسندهٔ مسئول، استاد، دانشکدهٔ مهندسی عمران، دانشگاه سمنان.

Email: kheyroddin@semnan.ac.ir

(۲) دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشکدهٔ مهندسی عمران، دانشگاه سمنان.

مقدمه

بسیاری از سازه‌های بتن‌آرمه که در معرض رطوبت، نمک و سایر مواد شیمیایی قرار می‌گیرند، مستعد خوردگی هستند. روش‌های مختلفی برای جلوگیری از خطر خوردگی وجود دارند، که یک روش مؤثر و درازمدت در رفع این مشکل استفاده از میلگردهای FRP (Fiber Reinforced polymer) می‌باشد. حجم سرمایه-گذاری‌های اولیه در ساخت سازه‌های مستعد خوردگی، دشواری جایگزینی اعضای آسیب‌دیده در اثر خوردگی و هزینهٔ بالای تعمیر و نگه‌داری، به‌کارگیری این میلگردها را از لحاظ اقتصادی توجیه می‌کنند [۱]. خواص دیگر میلگردهای FRP نظیر مقاومت کششی بسیار زیاد، مدول الاستیسیتهٔ قابل قبول، وزن کم، مقاومت خوب درمقابل خستگی و خزش، عایق بودن درمقابل امواج مغناطیسی و چسبندگی خوب با بتن، مجموعه‌ای از خواص مطلوب را تشکیل می‌دهد، که به جذابیت کاربرد FRP در بتن‌آرمه افزوده‌است؛ ولی بعضی از معایب نظیر مشکلات مربوط به خم کردن و رفتار کاملاً خطی آنها تا نقطهٔ شکست، مشکلاتی را ازنظر کاربرد آنها فراهم نموده‌اند [۲]. تیرهای بتن‌آرمه به‌عنوان یکی از اعضای سازه، اهمیت ویژه‌ای در عملکرد و ایمنی سازه دارند. مقالهٔ حاضر به بررسی استفاده از میلگردهای FRP به‌جای میلگردهای فولادی و تأثیر آن بر میزان تغییرمکان قائم کوتاه‌مدت در تیر بتنی می‌پردازد. تغییرمکان، به حفظ عملکرد و قابلیت بهره‌برداری سازه به‌منظور ایمنی و راحتی، جلوگیری از آسیب‌های ناشی از تغییرمکان‌های بیش از حد و حفظ زیبایی سازه مرتبط است، که باتوجه به هدف استفاده از سازه، باید سختی کافی و خیز منفی مناسب پیش‌بینی شود. تغییرمکان کوتاه‌مدت به تغییرمکان سازه یا عضو بلافاصله بعد از اعمال بار اطلاق می‌شود. تغییرمکان بلندمدت شامل تغییرمکان کوتاه‌مدت و تغییرمکان اضافی تحت بارهای پایدار می‌باشد. تغییرمکان کوتاه‌مدت و بلندمدت باید کوچک‌تر از تغییرمکان مجاز باشند. تغییرمکان مجاز سازه یا عضو باتوجه به نوع و هدف استفاده از سازه، نوع بارگذاری و غیره تعیین می‌شود. تغییرمکان بیش از حد اعضا سبب عدم احساس راحتی در استفاده از سازه و هم‌چنین کاهش کاربرد و ظاهر مناسب آن می‌گردد [3].

ایمجی و همکاران [4] یک روش نیمه‌عملی برای تعیین تغییرمکان ناشی از ترک برشی در تیرهای مسلح‌شده با GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer) ارائه نمودند. به‌جهت سختی کمتر میلگرد GFRP درمقایسه با فولاد، تغییرمکان قائم ناشی از برش می‌تواند بیش از ۳۰٪ کل خیز تیر باشد. نتایج نشان داد که مدل پیشنهادی درمقایسه با دستورالعمل‌های طراحی کنونی، دقیق‌ترین مقدار تغییرمکان قائم تیرهای بتن‌آرمه با میلگرد FRP را در هر دو حالت بار نهایی و سرویس پیش‌بینی می‌نماید. تیمن اسکاس و همکاران [5] کافی بودن مدل‌های تجربی را برای تیرهای بتنی مسلح با FRP بررسی کردند و استفاده از پیشنهادات طراحی آیین‌نامهٔ ACI 440.1R آمریکا را برای طراحی المان‌های بتنی مسلح با میلگردهای FRP پیشنهاد نمودند. آل سونا و همکاران [6] با بررسی پاسخ خمشی ۲٤ تیر و دال بتن‌آرمه با میلگردهای FRP شامل محدودهٔ وسیعی از درصدهای میلگرد دریافتند که تغییرمکان ناشی از مشارکت برش و پیوستگی، در المان‌های بتنی مسلح‌شده با میلگرد FRP در حالت بالانس و با درصد آرماتور بالا، از اهمیت بیشتری برخوردار است. فان و ژانگ [7] بتن پلیمری غیرآلی (IPC) inorganic polymer concrete مسلح‌شده با بازالت را، که ترکیبی از خصوصیات ویژهٔ IPC و میلگرد بازالت از قبیل مقاومت مناسب دربرابر خوردگی و آتش است، پیشنهاد کردند. تیر IPC مسلح با میلگرد بازالت پاسخ‌های بار- تغییرمکان وسط دهانه را در دو مرحله نشان می‌دهد. الگوی ترک‌خوردگی در این تیر مشابه تیر کنترل و عرض ترک حداکثر آن تقریباً دو برابر تیر کنترل می‌باشد. دستورالعمل‌های تیر بتن مسلح با میلگرد FRP برای پیش‌بینی مقاومت خمشی تیرهای IPC مسلح‌شده با بازالت نیز مناسب می‌باشد. هونگ و

همکاران [8] آزمایش‌های بارگذاری یکنواخت را برروی شش تیر بتنی با تکیه‌گاه ساده و مسلح با میلگردهای فولادی معمولی، GFRP و Basalt fiber reinforced) BFRP (plastic انجام دادند. آنها دریافتند که با نسبت یکسان سطح مقطع میلگردها، سختی خمشی پس از ترک‌خوردگی در تیرهای مسلح با FRP درمقایسه با تیرهای بتن‌آرمه با میلگرد فولادی معمولی، به‌طور قابل ملاحظه‌ای کمتر و فاصله و توزیع ترک‌ها در تیرهای مسلح با FRP به‌ترتیب بزرگ‌تر و پراکنده‌تر می‌باشد. گلدستون و همکاران [9] رفتار خمشی در تیرهای با بتن مقاومت بالا، High strength concrete (HSC) و بتن با مقاومت فوق‌العاده بالا، Ultra-High Strength Concrete (UHSC) مسلح با میلگردهای GFRP را به‌صورت آزمایشگاهی بررسی نمودند. نتایج جذب انرژی بیشتری را در تیرهای بتنی با مقاومت فوق العاده بالا نسبت به تیرهای بتنی مقاومت بالا با همان نسبت میلگرد GFRP نشان دادند. پیشنهادات طراحی FRP در ACI [10] و CSA [11] با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شد. در هر دو نوع تیر ظرفیت باربری ۳۶٪ کمتر و تغییرمکان به‌طور میانگین ٪ ۲۲-۱۰ کمتر پیش‌بینی گردید.

روابط حاکم بر تغییرمکان قائم

روابط ارائه‌شده برای کنترل تغییرمکان در آیین‌نامهٔ ACI 318 [12] اثرات بارهای دینامیکی مانند زلزله، باد یا ارتعاش ماشین‌آلات را درنظر نمی‌گیرند و فقط به بررسی تغییرمکان‌های سطوح سرویس تحت اثر بارهای استاتیکی ثابت و آنی می‌پردازند. کنترل تغییرمکان اعضای خمشی یک‌طرفه در ACI318 با دو روش که عبارت‌اند از محدودیت تغییرمکان‌های محاسبه‌شده (روش مستقیم) و رعایت حداقل ضخامت اعضا (روش غیرمستقیم)، بررسی می‌گردد. تغییرمکان در اعضای بتنی مسلح با میلگرد FRP، نسبت به اعضای مسلح با فولاد با آرایش و اندازهٔ میلگرد کاملاً یکسان، به متغیرهای مؤثر بر تغییرمکان حساس‌تر هستند، که به‌دلیل سختی متغیرها و ماهیت الاستیک- شکنندهٔ آنها می‌باشد. اعضای مسلح با میلگرد FRP به‌جهت خصوصیات خاص پیوستگی میلگرد FRP و هم‌چنین سختی کمتر این نوع میلگرد، تمایل به تغییرمکان‌های بزرگ‌تری دارند، درنتیجه استفاده از روش مستقیم کنترل تغییرمکان پیشنهاد می‌شود. یک مقطع ترک‌نخورده، ممان اینرسی برابر با ممان اینرسی کل (I_g) دارد. ترک‌خوردگی زمانی رخ می‌دهد که حداکثر ممان بار سرویس (M_a) از ممان ترک‌خوردگی (M_{cr}) تجاوز کند و باعث کاهش سختی عضو شود. ممان اینرسی ترک‌خورده (I_{cr}) برای عضو مستطیلی با یک ردیف میلگرد بااستفاده از آنالیز الاستیک ارائه‌شده برای مقاطع ترک‌خوردهٔ تغییرشکل‌یافته، به‌وسیلهٔ روابط (۱) و (۲) محاسبه می‌شود [10].

$$I_{cr} = \frac{bd^3}{3}k^3 + n_f A_f d^2 (1-k)^2 \qquad (۱)$$

$$k = \sqrt{2\rho_f n_f + (\rho_f n_f)^2} - \rho_f n_f \qquad (۲)$$

که b عرض مقطع مستطیلی تیر (میلی‌متر)، d فاصلهٔ دورترین تار فشاری تا مرکز سطح میلگرد کششی (میلی‌متر)، n_f نسبت مدول الاستیسیتهٔ میلگردهای FRP به مدول الاستیسیتهٔ بتن، A_f مساحت میلگردهای FRP (میلی‌متر مربع) و ρ_f نسبت میلگردهای FRP است.

برانسون [13] مفهوم ممان اینرسی مؤثر (I_e) را مطابق رابطهٔ (۳) معرفی کرد. ممان اینرسی مؤثر برای محاسبهٔ دو پدیدهٔ اثر سخت‌شدگی کششی بتن و تغییرات EI در طول عضو کاربرد دارد.

$$I_e = I_{cr} + \left(I_g - I_{cr}\right)\left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3 \le I_g \qquad (۳)$$

خیرالدین و میرزا [14] یک رابطهٔ جدید برای تخمین سختی خمشی (EI) تیرهای بتن‌آرمه ارائه نموده‌اند، که در رابطهٔ پیشنهادی آنها اثرات نسبت میلگرد فشاری و کششی، مقاومت فشاری و نوع بارگذاری درنظر گرفته شده‌است. خیرالدین [15] دریافت که درنظر گرفتن میلگردها، مدول الاستیسیته و اثر نوع بارگذاری، سبب افزایش ۲۵ درصدی تغییرمکان قائم در تیرها می‌شود.

توسط بیشُف [16] ثابت شد که رابطهٔ برانسون سختی عضو را زمانی‌که I_g/I_{cr} عضو تقریباً بزرگ‌تر از ۳ یا ٤ است، زیاد برآورد می‌کند. این امر با بیشتر تیرهای بتن‌آرمه با میلگرد FRP است، که به‌طور نمونه I_g/I_{cr} بین ٥ تا ۲٥ دارند، مطابقت می‌کند. بنموکرین و همکاران [17] برای اولین بار یک ضریب تصحیح تجربی را در رابطهٔ برانسون قرار دادند و برآورد مناسبی از تغییرشکل محاسبه‌شده به‌دست آوردند. بیشُف [16] عبارت جایگزینی برای ممان اینرسی مؤثر پیشنهاد نمود، که برای هر دو حالت اعضای بتنی مسلح‌شده با فولاد و FRP بدون نیاز به ضرایب تصحیح تجربی، به‌طور یکسان خوب عمل می‌کند. عبارت اولیهٔ برانسون یک میانگین وزنی سختی اعضای ترک‌خورده و ترک‌نخورده را بیان می‌کند (E_cI)؛ درحالی‌که روش پیشنهادی بیشُف یک میانگین وزنی نرمی را بیان می‌کند ($1/E_cI$). روش استفاده از میانگین وزنی نرمی پاسخ بهتری به تغییرمکان اعضای با ترک‌های گسسته در امتداد طول آن می‌دهد. بیشُف و اسکانلون [18] عبارت پیشنهادشده توسط بیشُف را با گنجاندن یک ضریب اضافی γ برای درنظر گرفتن تغییرات سختی در امتداد طول عضو به‌صورت رابطهٔ (٤) تصحیح کردند.

$$I_e = \frac{I_{cr}}{1-\gamma\left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^2\left[1-\frac{I_{cr}}{I_g}\right]} \leq I_g \quad , M_a \geq M_{cr} \qquad (٤)$$

این رویکرد برآورد قابل قبولی از تغییرشکل تیرها و دال‌های یک‌طرفهٔ بتنی مسلح با FRP فراهم می‌کند [۱۹]. ضریب γ وابسته به بار و شرایط مرزی است و طول نواحی ترک‌نخوردهٔ عضو و تغییرات سختی در نواحی ترک‌خورده را درنظر می‌گیرد. به‌جای تحلیل‌های جامع‌تر، همان‌طور که بیشُف و گروس [20] پیشنهاد کردند، ضریب $\gamma = 1.72 - 0.72(M_{cr}/M_a)$ را می‌توان درنظر گرفت، که حاصل انتگرال‌گیری انحنای بالای طول تیری با تکیه‌گاه ساده و بارگذاری یکنواخت است [10].

بعد از ترک‌خوردگی، عمل ترکیبی بین بتن و میلگردهای FRP ممکن است به‌طوری‌که معمولاً فرض می‌شود، کامل نباشد [17, 21]. علاوه‌بر این، انقباض و رفتار غیرخطی بتن در ناحیهٔ فشاری، بر سختی المان‌های بتن مسلح تأثیرگذار است [22]. رابطهٔ (٥) توسط بنموکرین و همکاران [17] پیشنهاد گردید، که بااستفاده از تعداد محدودی از آزمایش‌ها کالیبره شده‌است.

$$I_e = \alpha_0 I_{cr} + \left(\frac{I_g}{\beta_0} - \alpha_0 I_{cr}\right)\left[\frac{M_{cr}}{M_a}\right]^3 \qquad (٥)$$

α_0 و β_0 به‌ترتیب، برابر با ۰/۸٤ و ۷ هستند. این رابطه انعطاف‌پذیری بیشتری درمقایسه با رابطهٔ ACI 440.1R [23] ارائه می‌دهد [6]. نتایج مطالعات بیشُف [۲۱] و بیشُف و اسکانلون [18] نشان می‌دهد که روش پیشنهادی ACI 318 [23] برای بتن مسلح با میلگرد GFRP مناسب نیست، ازاین‌رو روابط (٦) و (۷) برای I_e پیشنهاد گردید، که این روابط به‌طور یکسان برای تیرهای بتنی مسلح‌شده با فولاد و FRP قابل استفاده هستند [6].

$$I_e = \frac{I_{cr}}{1-\eta\left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^2} \leq I_g \qquad (٦)$$

$$\eta = 1 - \frac{I_{cr}}{I_g} \qquad (۷)$$

موسوی و همکاران [۱] براساس داده‌های تجربی موجود و بهینه‌یابی با الگوریتم ژنتیک، رابطهٔ برانسون را به‌صورت تابعی درنظر گرفتند، که اثر مدول الاستیسیتهٔ میلگردها، نسبت آرماتور و سطح بارگذاری را در توان m وارد می‌کند. شکل کلی رابطهٔ پیشنهادی مطابق با رابطهٔ (۸) و توان m به‌صورت رابطهٔ (۹) درنظر گرفته شده‌است.

$$(I_e)_{theo} = X_5\left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^m I_g + X_6\left[1-\left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^m\right] I_{cr} \qquad (۸)$$

$$m = X_1 + X_2\frac{\rho}{\rho_b} + X_3\frac{M_{cr}}{M_a} + X_4\frac{E_F}{E_s} \qquad (۹)$$

مطابق با تابع هدف ارائه‌شده در رابطهٔ (۱۰)، مقادیر X_1 تا X_6 پیشنهادی در جدول (۱) نشان داده شده‌است.

جدول ۱ پاسخ بهینه‌یابی برای مدل پیشنهادی [۱]

X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6
۰/٦٦	−۰/۳۰	۱/۹٤	٤/٦٤	۰/۱٥	۰/۸۹

$$e = |\delta_{exp} - \delta_{cal}| \quad (۱۰)$$

تغییرمکان وسط دهانهٔ تیرهای تحت خمش چهارنقطه‌ای مطابق با تحلیل سازه بااستفاده از رابطهٔ (۱۱) محاسبه می‌شود:

$$\Delta_{max} = \frac{Pa}{48E_cI_e}(3L^2 - 4a^2) \quad (۱۱)$$

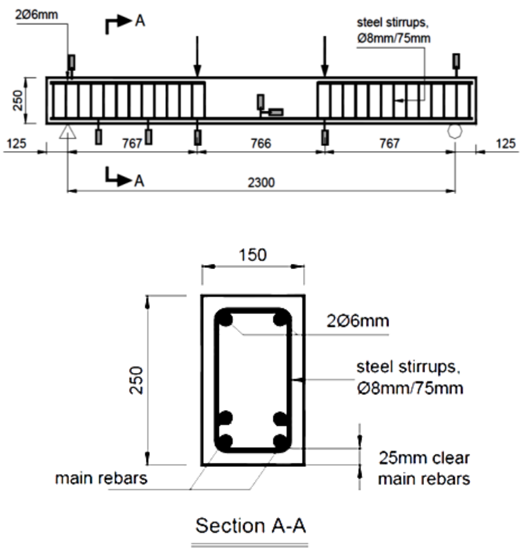
L طول کل دهانهٔ تیر، a طول دهانهٔ برشی (فاصلهٔ هر یک از بارهای نقطه‌ای تا تکیه‌گاه)، E_c مدول الاستیسیته بتن و P کل بار نقطه‌ای متمرکزی است که برروی تیر وارد می‌شود.

به‌منظور تعیین میزان خطا (e) در محاسبهٔ تغییرمکان وسط دهانه نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی تیرهای بتن مسلح با درصدهای مختلف میلگردهای FRP از رابطهٔ (۱۲) استفاده می‌شود.

$$e = \frac{|\Delta_{exp} - \Delta_{cal}|}{\Delta_{exp}} \times 100 \quad (۱۲)$$

صحت‌سنجی به روش عددی

به‌منظور ارزیابی صحت و دقت نتایج خروجی تیر مدل‌سازی‌شده در نرم‌افزار آباکوس، مشخصات فنی و هندسی تیر مطابق با نمونهٔ آزمایش آل سونا و همکاران [6] انتخاب گردید. ابعاد هندسی و نحوهٔ آرماتورگذاری تیر در شکل (۱) نشان داده شده‌است. میلگردهای GFRP با قطر اسمی ٦ میلی‌متر به‌عنوان میلگرد فشاری در دهانهٔ برشی برای نگه‌داری خاموت‌ها استفاده شده‌اند و تیر تحت بارگذاری چهارنقطه‌ای قرار دارد. در نمونهٔ آزمایشگاهی، بار کل به‌وسیلهٔ یک دستگاه هیدرولیکی ٦۰۰ کیلو نیوتن اعمال شده و از یک تیر بارگذاری با دو بار متمرکز یکسان که به‌طور متقارن نسبت به وسط دهانه قرار دارد، استفاده شده‌است. برای شبیه‌سازی بارگذاری آزمایشگاهی در نرم‌افزار آباکوس، روش کنترل تغییرمکان به‌کار گرفته شده‌است.



شکل ۱ ابعاد هندسی و آرایش میلگردهای طولی و عرضی نمونه آزمایشگاهی [4]

مشخصات بتن، فولاد و میلگرد GFRP مورد استفاده در مدل‌سازی به‌ترتیب در جدول (۲) و (۳) ارائه شده‌است. برای مدل‌سازی رفتار بتن از مدل آسیب‌دیدهٔ پلاستیک، Concrete Damage Plasticity (CDP) استفاده شده‌است. مشخصات محدودهٔ پلاستیک بتن در جدول (٤) نشان داده شده‌است.

جدول ۲ مشخصات مکانیکی بتن مدل‌سازی شده [6]

مصالح	مقاومت فشاری (مگاپاسکال)	مدول الاستیسیته (گیگاپاسکال)	کرنش نهایی
بتن	٤١/٦	۲۹/۵	۰/۰۰۳

جدول ۳ مشخصات مکانیکی فولاد و میلگرد GFRP

مصالح	مقاومت کششی (مگاپاسکال)	مدول الاستیسیته (گیگاپاسکال)	کرنش نهایی
فولاد	۵۰۰	۲۰۰	۰/۱٦
GFRP	٦۲۰	٤۲	۰/۰۱٦

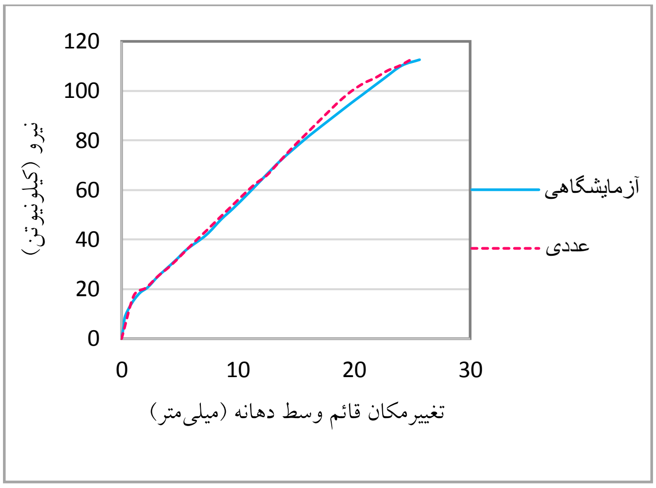
جدول ٤ پارامتر مدل CDP در مدل‌های صحت‌سنجی‌شده

زاویهٔ اتساع	خروج از مرکزیت	f_{b0}/f_{c0}	K	پارامتر ویسکوزیته
۲۰	۰/۱	۱/۱٦	۰/٦٦۷	۰/۰۰۱

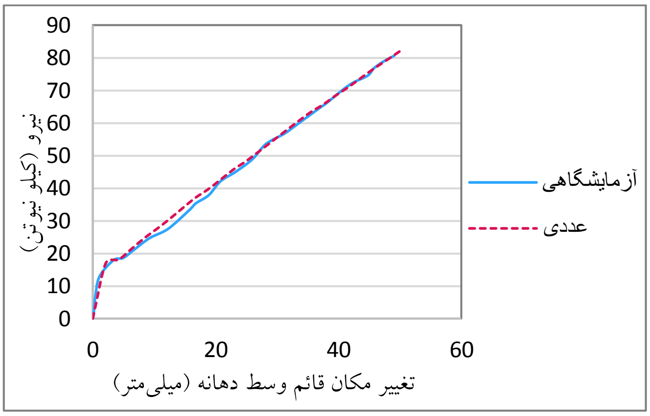
این مدل پیچیده‌ترین و پرکاربردترین مدل رفتاری می‌باشد که قابل استفاده در محاسبات استاتیکی و دینامیکی است. در مدل پلاستیک آسیب‌دیدهٔ بتن، دو مکانیزم برای انهدام بتن پیش‌بینی شده‌است. مکانیزم اول، ترک‌خوردگی بتن تحت کشش است و مکانیزم دوم، خُردشدگی بتن تحت فشار می‌باشد. برای مدل‌سازی رفتار فولاد در تحلیل غیرخطی از مدل الاستوپلاستیک با سخت‌شوندگی (مدل دوخطی) استفاده شده‌است. میلگرد FRP نیز دارای نمودار تنش-کرنش خطی تا لحظهٔ شکست می‌باشد.

در روش تحلیل اجزای محدود نوع مصالح انتخابی برای مصالح در نتایج تأثیرگذار است. برای مدل کردن کامل رفتار کششی بتن در نرم‌افزار آباکوس، رفتار پس گسیختگی تنش- کرنش برای کشش درنظر گرفته می‌شود. این رفتار با سخت‌شدگی کششی، نرم‌شدگی کرنشی و اندرکنش آرماتور و بتن به‌دست می‌آید. برای تعریف تنش- کرنش فشاری بتن مقدار تنش‌ها σ_c، کرنش‌های غیر الاستیک ε_c^{in} متناظر با مقادیر تنش و خواص آسیب‌دیدگی d_c تعریف می‌شود. برای مدل‌سازی بتن، از المان سه‌بعدی هشت‌گرهی با تابع شکل درجه یک (C3D8R) و برای خاموت و میلگرد FRP و فولادی از المان تیر سه‌بعدی با تابع شکل درجه یک (B31) استفاده شده‌است. این المان‌ها قابلیت مدل‌سازی رفتار غیرخطی بتن و فولاد را دارند. برای تعریف اندرکنش بین بتن و آرماتورها از قید ناحیهٔ مدفون‌شده (embedded region) استفاده شده‌است. این قید اجازه می‌دهد که هر گره از المان‌های میلگرد به نزدیک‌ترین گره از المان‌های بتن به‌خوبی متصل شود. با درنظر گرفتن این قید، آرماتورهای طولی و عرضی به‌طور پیوسته با بتن در ارتباط هستند.

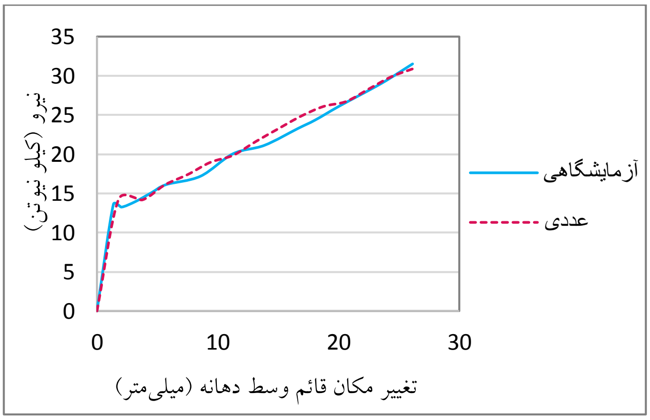
به‌منظور صحت‌سنجی، سه نمونه تیر بتنی به‌ترتیب با ٤ میلگرد کششی GFRP به‌قطر ۱۹ میلی‌متر (حالت خردشدگی بتن)، ۲ میلگرد کششی GFRP به‌قطر ۱۳ میلی‌متر (حالت بالانس) و ۲ میلگرد کششی GFRP به‌قطر ۹/۵ میلی‌متر (حالت گسیختگی میلگرد) با مشخصات مذکور در نرم‌افزار آباکوس مدل شد. نتایج حاصل از مقایسهٔ نمونهٔ آزمایشگاهی و مدل‌سازی‌شده در سه حالت خردشدگی بتن، بالانس و گسیختگی میلگرد به‌ترتیب در شکل‌های (۲)، (۳) و (٤) نشان داده شده‌است. برای تیر مدل‌سازی‌شده، همان‌گونه که از نمودار مشاهده می‌گردد؛ نیروی بیشینهٔ حاصل از خروجی نرم‌افزار آباکوس، مقدار ۱۱٦/۸۱ کیلو نیوتن می‌باشد که به‌مقدار گزارش‌شده در آزمایش آل سونا و همکاران (۱۱۲/٦ کیلو نیوتن) بسیار نزدیک است (۳/۷ درصد خطا). مقدار تغییرمکان وسط دهانهٔ تیر حاصل از نرم‌افزار آباکوس، برابر ۲۵ میلی‌متر و مقدار آزمایشگاهی ۲۵/٦۵ میلی‌متر است (۲/۵ درصد خطا). نیروی ترک‌خوردگی تیر از مدل عددی ۱۹/۸ کیلو نیوتن و در مدل آزمایشگاهی ۱۸/٦٤ کیلو نیوتن به‌دست آمده‌است (٦ درصد خطا). تغییرمکان ترک‌خوردگی حاصل از نرم‌افزار آباکوس، ۱/۳۲ میلی‌متر و تغییرمکان حاصل از آزمایش ۱/٤٦ میلی‌متر می‌باشد (۹ درصد خطا).



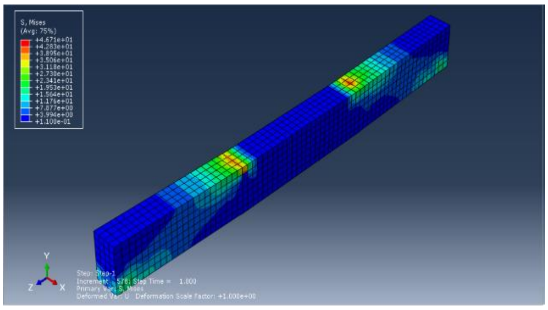
شکل ۲ مقایسهٔ منحنی بار- تغییرمکان وسط دهانه حاصل از نرم‌افزار آباکوس با نتایج آزمایشگاهی در حالت خردشدگی بتن



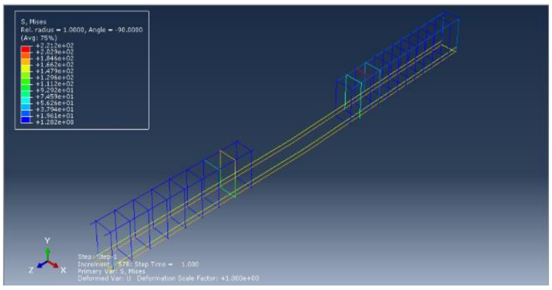
شکل ۳ مقایسهٔ منحنی بار- تغییرمکان وسط دهانه حاصل از نرم‌افزار آباکوس با نتایج آزمایشگاهی در حالت بالانس



شکل ٤ مقایسهٔ منحنی بار- تغییرمکان وسط دهانه حاصل از نرم‌افزار آباکوس با نتایج آزمایشگاهی در حالت گسیختگی میلگرد



(الف)



(ب)

شکل ۵ الف) کانتور تنش در بتن، ب) کانتور تنش میلگرد GFRP و خاموت

در حالت بالانس نیروی حاصل از مدل عددی و نتایج آزمایشگاهی به‌ترتیب ۱۶/۹۳ و ۱۶/۴۰ می‌باشد (۲/۷ درصد خطا). در حالت گسیختگی میلگرد نیروی ترک‌خوردگی حاصل از مدل عددی و نتایج آزمایشگاهی به‌ترتیب ۱۴/۲۴ و ۱۳/۶۱ می‌باشد (۴/۶ درصد خطا).

کانتور تنش بتن، میلگردهای GFRP و خاموت‌های نمونهٔ مدل‌شده در تغییرمکان ۲۵ میلی‌متر در شکل (۵) نشان داده شده‌است، که باتوجه به شکل بیشترین تنش در بتن در ناحیهٔ فشاری و محل اعمال نیرو می‌باشد و بتن در این ناحیه دچار آسیب‌دیدگی می‌شود که مطابق با نوع گسیختگی در نمونهٔ آزمایشگاهی می‌باشد.

نمونه‌های مدل‌سازی‌شده در نرم‌افزار آباکوس

برای مطالعهٔ تغییرمکان تیرهای بتن‌آرمه با میلگرد FRP، ۹ تیر بتنی مسلح با درصدها و انواع مختلف میلگرد FRP در نرم‌افزار آباکوس مدل شده‌اند.

خصوصیات تیرهای مختلف مدل‌شده در جدول (۵) ارائه شده‌است. هم‌چنین خصوصیات تیر بتن‌آرمه با میلگرد AII با درصد میلگرد مختلف در جدول (٦) ارائه شده‌است.

در نام‌گذاری نمونه‌ها، B مخفف تیر (Beam) می‌باشد. G برای نشان دادن میلگرد کامپوزیت شیشه (GFRP)، C میلگرد کامپوزیت کربن (CFRP)، A میلگرد کامپوزیت آرامید (AFRP) و S میلگرد فولادی AII است. اعداد نیز نشان‌دهندهٔ مساحت میلگردهای کششی به (mm^2) می‌باشد.

خصوصیات مکانیکی میلگردهایFRP مورداستفاده در نرم‌افزار آباکوس در جدول (۷) ارائه شده‌است.

جدول ۵ خصوصیات تیرهای بتن‌آرمه با میلگردهای FRP مدل‌شده در نرم‌افزار آباکوس

ردیف	مساحت میلگرد کششی (m^2)	نسبت آرماتور(ρ_f)	چیدمان میلگردهای کششی	نوع گسیختگی
BG1134	۱۱۳٤	۰/۰۳۹	٤ میلگرد GFRP به‌قطر ۱۹ میلی‌متر در دو ردیف	خردشدگی بتن
BG142	۱٤۲	۰/۰۰٤	۲ میلگرد GFRP به‌قطر ۹/۵ میلی‌متر	گسیختگی میلگرد
BG265	۲٦٥	۰/۰۰۸	۲ میلگرد GFRP به‌قطر ۱۳ میلی‌متر	حالت بالانس
BC1134	۱۱۳٤	۰/۰۳۹	٤ میلگرد CFRP به‌قطر ۱۹ میلی‌متر در دو ردیف	خردشدگی بتن
BC142	۱٤۲	۰/۰۰٤	۲ میلگرد CFRP به‌قطر ۹/۵ میلی‌متر	گسیختگی میلگرد
BC265	۲٦٥	۰/۰۰۸	۲ میلگرد CFRP به‌قطر ۱۳ میلی‌متر	حالت بالانس
BA1134	۱۱۳٤	۰/۰۳۹	٤ میلگرد AFRP به‌قطر ۱۹ میلی‌متر در دو ردیف	خردشدگی بتن
BA142	۱٤۲	۰/۰۰٤	۲ میلگرد AFRP به‌قطر ۹/۵ میلی‌متر	گسیختگی میلگرد
BA265	۲٦٥	۰/۰۰۸	۲ میلگرد AFRP به‌قطر ۱۳ میلی‌متر	حالت بالانس

جدول ٦ خصوصیات تیرهای بتن‌آرمهٔ مدل شده در نرم‌افزار آباکوس

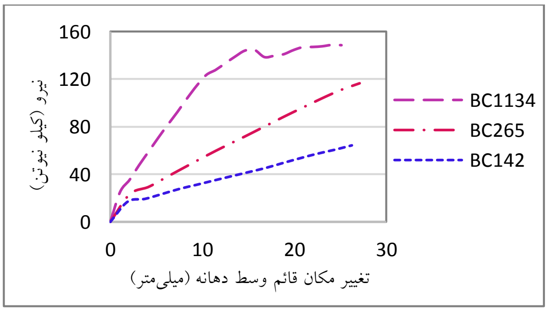
نوع تیر	مساحت میلگرد کششی (m^2)	نسبت آرماتور(ρ)	چیدمان میلگردهای کششی	نوع گسیختگی
BS1134	۱۱۳٤	۰/۰۳۹	٤ میلگرد A II به‌قطر ۱۹ میلی‌متر در دو ردیف	خردشدگی بتن
BS142	۱٤۲	۰/۰۰٤	۲ میلگرد A II به‌قطر ۹/۵ میلی‌متر	گسیختگی میلگرد
BS265	۲٦٥	۰/۰۰۸	۲ میلگرد A II به‌قطر ۱۳ میلی‌متر	حالت بالانس

جدول ۷ خصوصیات مکانیکی میلگردهای مدل‌شده

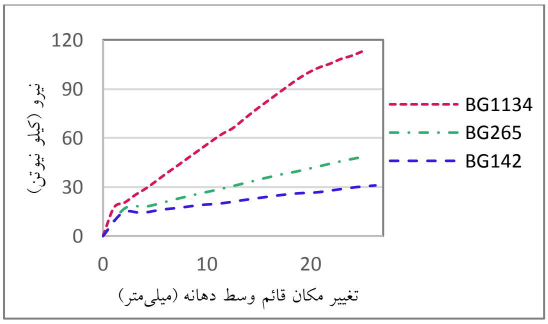
میلگرد FRP	مقاومت کششی نهایی (MPa)	مدول الاستیسیته (GPa)
GFRP[6]	٦۷۰	٤۲
CFRP[6]	۱۳۲۰	۱۲۳
AFRP[24]	۱۸۰۰	۵۲

مقایسهٔ نمودار نیرو- تغییرمکان در تیرهای بتن‌آرمه با میلگرد FRP و درصد آرماتور متفاوت

مقایسهٔ نمودار نیرو- تغییرمکان با نسبت آرماتورهای متفاوت برای تیرهای بتن‌آرمه با آرماتورهای CFRP، GFRP، AFRP و A II به‌ترتیب در شکل‌های (٦)، (۷)، (۸) و (۹) نشان داده شده‌است. در جدول‌های (۸)، (۹)، (۱۰) و (۱۱) تغییرمکان تیرهای بتن‌آرمه با انواع میلگرد و با نسبت‌های متفاوت آرماتور مورد بررسی قرار گرفته‌است. در تیرهای بتن‌آرمه مشاهده می‌شود که تا قبل از نیروی ترک‌خوردگی سختی تیرهای بتن‌آرمه با وجود نسبت‌های متفاوت میلگرد، یکسان می‌باشد.



شکل ٦ مقایسه منحنی بار- تغییرمکان تیرهای بتن‌آرمه با درصدهای مختلف میلگرد CFRP



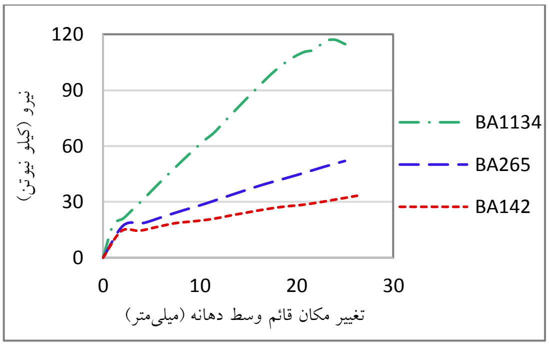
شکل ۷ مقایسهٔ منحنی بار- تغییرمکان قائم تیرهای بتن‌آرمه با درصدهای مختلف میلگرد GFRP

جدول ۸ مقایسهٔ تغییرمکان در تیرهای بتن‌آرمه با CFRP

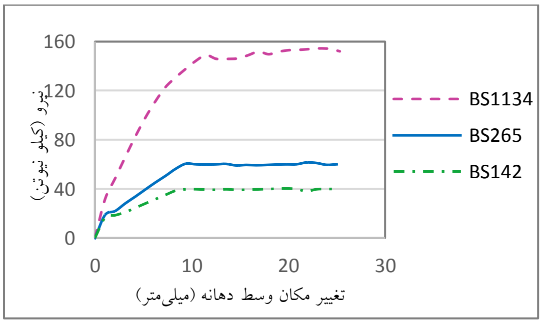
نیرو (kN)	تغییرمکان قائم وسط دهانه (mm)		
	BC142	BC265	BC1134
۲۰	۲/۷۰	۱/٦۱	۰/۷۷
٦۰	۲٤/۳۳	۱۱/۵۲	٤/۲۵
٦٥	۲٦/۳۹	۱۲/۵۵	٤/۷۰

جدول ۹ مقایسهٔ تغییرمکان در تیرهای بتن‌آرمه با GFRP

نیرو (kN)	تغییرمکان قائم وسط دهانه (mm)		
	BG142	BG265	BG1134
۲۰	۱۱/۰۹	۵/۷۲	۱/۹٤
۳۰/۹۵	۲۵/۹٦	۱۲/۷۵	٤/۷



شکل ۸ مقایسهٔ منحنی بار- تغییرمکان تیرهای بتن‌آرمه با درصدهای مختلف میلگرد AFRP



شکل ۹ مقایسهٔ منحنی نیرو-تغییرمکان تیرهای بتن‌آرمه با درصدهای مختلف میلگرد AII

جدول ۱۰ مقایسهٔ تغییرمکان در تیرهای بتن‌آرمه با AFRP

نیرو (kN)	تغییرمکان قائم وسط دهانه (mm)		
	BA142	BA265	BA1134
۲۰	۹/۲۹	۵/۳۵	۱/۵٤
۳۳/۲۷	۲٦/۲٦	۱۳/۲۳	٤/٦۱

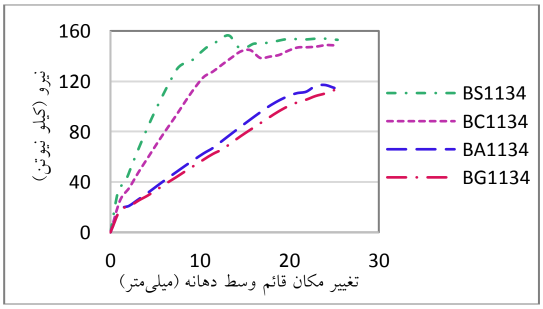
جدول ۱۱ مقایسهٔ تغییرمکان در تیرهای بتن‌آرمه با میلگرد AII

نیرو (kN)	تغییرمکان قائم وسط دهانه (mm)		
	BS142	BS265	BS1134
۲۰	۳/۱۰	۱/۰۳	۰/۵۲
٤۰	۸/٦۲۲	۵/۱۷	۱/۲۱

در تیرهای مدل‌سازی‌شده مشاهده می‌شود که با افزایش درصد میلگرد، تغییرمکان وسط دهانهٔ تیر به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. گسیختگی میلگردهای FRP یک مود شکست نامطلوب است و سبب تسلیم ناگهانی تیر می‌شود؛ بنابراین باتوجه به بررسی‌های انجام‌شده پیشنهاد می‌گردد که تیر بتنی با آرماتور بالا طراحی شود تا خردشدگی بتن در ناحیهٔ فشاری سبب گسیختگی تیر گردد. میزان تغییرمکان قائم وسط دهانه برای تیرهایی با $\rho_{fb}<\rho_f$ به‌ازای یک نیروی یکسان خیلی کمتر است.

مقایسهٔ نمودار نیرو- تغییرمکان قائم در تیرهای بتن‌آرمه با میلگردهای متفاوت و درصد آرماتور یکسان

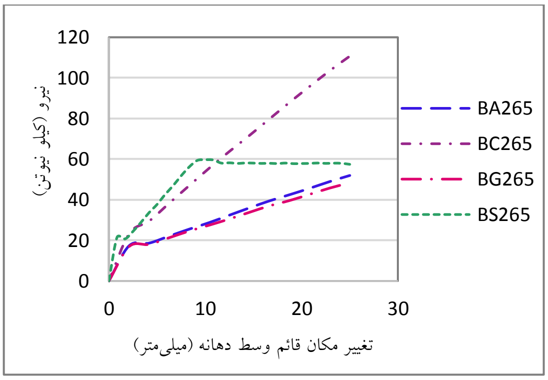
برای بررسی تأثیر نوع میلگرد مصرفی بر تغییرمکان قائم در یک تیر بتنی با شرایط یکسان، نمودار نیرو- تغییرمکان قائم تیرها مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در شکل‌های (۱۰)، (۱۱) و (۱۲) به‌ترتیب نمودار نیرو-تغییرمکان قائم در حالت‌های ρ=۰/۰۳۹، ρ=۰/۰۰۸ و ρ=۰/۰۰٤ برای تیرهای بتنی مسلح با چهار نوع مختلف میلگرد با هم مقایسه شده‌است. در جداول (۱۲)، (۱۳) و (۱٤) به‌ترتیب میزان نیروی قابل تحمل توسط تیرهای مسلح‌شده با میلگردهای مختلف در ρ=۰/۰۳۹، ρ=۰/۰۰۸ و ρ=۰/۰۰٤ ارائه شده‌است.



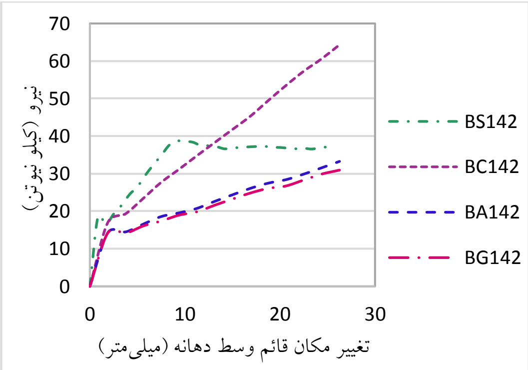
شکل ۱۰ مقایسهٔ منحنی نیرو-تغییرمکان تیرهای بتن‌آرمه با میلگردهای متفاوت و نسبت میلگرد ۰/۰۳۹

جدول ۱۲ مقایسهٔ مقدار نیرو در تیرهای مختلف به‌ازای ρ=۰/۰۳۹

تغییرمکان قائم(mm)	نیرو (kN)			
	BG1134	BC1134	BA1134	BS1134
۱۱/٤۷	٦۲/۳۷	۱۲۷/۸۲	٦۷/۰۹	۱٤۹/٦۷



شکل ۱۱ مقایسهٔ منحنی بار–تغییرمکان تیرهای بتن‌آرمه با میلگردهای متفاوت و نسبت میلگرد ۰/۰۰۸



شکل ۱۲ مقایسهٔ منحنی نیرو–تغییرمکان تیرهای بتن‌آرمه با میلگردهای متفاوت و نسبت میلگرد ۰/۰۰٤

جدول ۱۳ مقایسهٔ مقدار نیرو در تیرهای مختلف به‌ازای ρ=۰/۰۰۸

تغییرمکان	نیرو (kN)			
قائم (mm)	BG265	BC265	BA265	BS265
۹/۳۹	۲٦/۰٦	۵۱/۳۰	۲۷/۱۱	۵۹/٦٤
۱۱/٤۷	۲۸/۹۹	۵۹/۷۵	۳۰/٥٦	۵۸/۳٦

جدول ۱٤ مقایسهٔ مقدار نیرو در تیرهای مختلف به‌ازای ρ=۰/۰۰٤

تغییرمکان	نیرو (kN)			
قائم (mm)	BG142	BC142	BA142	BS142
۸/۳۵	۱۸/۱۱	۲۹/۳۰	۱۹/۰۹	۳۷/۵۹
۱۰/۳٤	۱۹/٤۲	۳۳	۲۰/۰۸	۳۸/۵۷

جدول ۱۵ مقایسهٔ مقدار ممان ترک‌خوردگی حاصل از نرم‌افزار آباکوس و مقدار محاسباتی

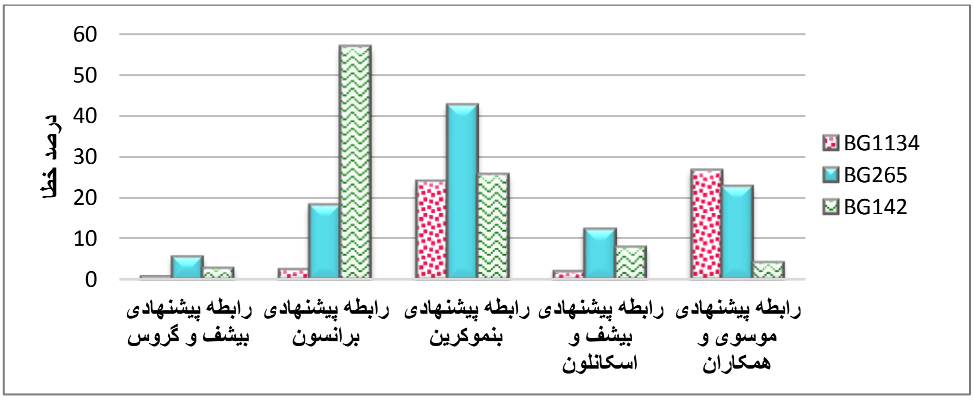
نوع تیر	BA142	BA265	BA1134	BC142	BC265	BC1134	BG142	BG265	BG1134
$M_{cr\ cal}$ (kN-m)	۱/۰٤	۱/۰٤	۱/۰٤	۱/۰٤	۱/۰٤	۱/۰٤	۱/۰٤	۱/۰٤	۱/۰٤
M_{cr} (kN-m)	۵/٤۸	٦/٦٤	٦/۷٦	٦/۵۳	۸/۹۰	۹/٦۱	۵/٤٦	٦/٤۹	٦/٦۸

باتوجه به شکل (۱۱) و (۱۲) تیرهای بتنی مسلح با میلگردهای CFRP با نسبت میلگرد ۰/۰۰۸ و ۰/۰۰٤، باتوجه به رفتار الاستیک خطی میلگردهای CFRP عملکرد بهتری پس از نیروی تسلیم، نسبت‌به میلگردهای فولادی در تیرهای بتن‌آرمه دارند. مقدار ممان ترک‌خوردگی خروجی از نرم‌افزار آباکوس و مقدار محاسباتی در جدول (۱۵) ارائه شده‌است. مقادیر ممان ترک‌خوردگی محاسباتی به‌دلیل درنظر نگرفتن مقدار میلگرد در بتن و نوع میلگرد مصرفی نسبت‌به نتایج خروجی حاصل از نرم‌افزار آباکوس متفاوت هستند.

ممان ترک خوردگی محاسباتی به دلیل در نظر گرفتن مقدار میلگرد در بتن و نوع میلگرد مصرفی مقادیر متفاوتی نسبت به نتایج حاصل از نرم افزار آباکوی ارائه می‌دهد. با بررسی برخی از روابط پیشنهادی موجود برای محاسبهٔ ممان اینرسی مؤثر میلگردهای FRP، ممان اینرسی تیرهای بتن‌آرمه با میلگردهای GFRP، CFRP و AFRP محاسبه شد و بااستفاده از رابطهٔ (۱۱) تغییرمکان وسط دهانهٔ تیرها محاسبه گردید سپس درصد خطا با توجه به اختلاف مقادیر فوق با مقادیر خروجی از نرم افزارتعیین گردید. میزان خطای محاسبه‌شده مطابق رابطهٔ شمارهٔ (۱۲) در این مقاله برای روابط پیشنهادی مختلف در جدول‌های شمارهٔ (۱٦) و (۱۷) و (۱۸) به‌ترتیب برای میلگردهای کامپوزیتی شیشه GFRP، کربن CFRP و آرامید AFRP ارائه شده‌است. نمودار مقایسه‌ای درصد

خطا باتوجه به روابط پیشنهادی به‌ترتیب برای میلگردهای GFRP، CFRP و AFRP در شکل‌های شمارهٔ (۱۳)، (۱٤) و (۱۵) نشان داده شده‌است.

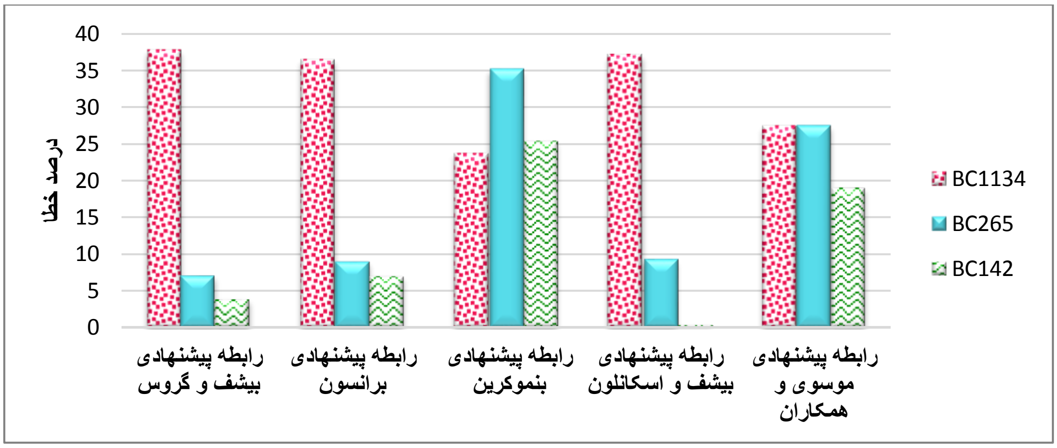
باتوجه به این‌که طراحی تیرهای بتن‌آرمه با میلگرد GFRP با درصد آرماتور بالا پیشنهاد شده‌است و درصد خطا براساس رابطهٔ بیشف و گروس در این حالت کمتر از ۱٪ می‌باشد، برای تیرهای بتنی مسلح‌شده با میلگرد GFRP می‌توان از روابط بیشُف و گروس برای پیش‌بینی تغییرشکل وسط دهانهٔ تیر استفاده نمود. رابطهٔ پیشنهادی بیشف و اسکانلون نیز با درصد خطای حدود ۲٪ تقریب خوبی برای محاسبهٔ تغییرمکان وسط دهانهٔ تیر در حالت مسلح‌شده با میلگرد GFRP می‌باشد.



شکل ۱۳ مقایسهٔ درصد خطا در تغییرمکان قائم تیرهای مسلح با میلگرد GFRP

جدول ۱٦ محاسبهٔ درصد خطا در تغییرمکان محاسباتی و مدل‌شدهٔ تیر با میلگرد GFRP در نرم‌افزار آباکوس

نوع تیر	فرمول مورد استفاده برای محاسبهٔ I_e	درصد خطا (e)	I_g/I_{cr}
BG1134	رابطهٔ پیشنهادی بیشُف و گروس	۰/۷٤	٤/۹۵
BG1134	رابطهٔ پیشنهادی برانسون	۲/٤۳	٤/۹۵
BG1134	رابطهٔ پیشنهادی بنموکرین و همکاران	۲۳/۷۷	٤/۹۵
BG1134	رابطهٔ پیشنهادی بیشُف و اسکانلون	۱/۹٤	٤/۹۵
BG1134	رابطهٔ پیشنهادی موسوی و همکاران	۲٦/۵۲	٤/۹۵
BG265	رابطهٔ پیشنهادی بیشُف و گروس	۵/۵۲	۱۳/۷۷
BG265	رابطهٔ پیشنهادی برانسون	۱۸/۱۷	۱۳/۷۷
BG265	رابطهٔ پیشنهادی بنموکرین و همکاران	٤۲/۵٦	۱۳/۷۷
BG265	رابطهٔ پیشنهادی بیشُف و اسکانلون	۱۲/۲۵	۱۳/۷۷
BG265	رابطهٔ پیشنهادی موسوی و همکاران	۲۲/۷۲	۱۳/۷۷
BG142	رابطهٔ پیشنهادی بیشُف و گروس	۲/۷۳	۲۲/۹۵
BG142	رابطهٔ پیشنهادی برانسون	۵٦/۸۳	۲۲/۹۵
BG142	رابطهٔ پیشنهادی بنموکرین و همکاران	۲۵/۵۷	۲۲/۹۵
BG142	رابطهٔ پیشنهادی بیشُف و اسکانلون	۷/۸۹	۲۲/۹۵
BG142	رابطهٔ پیشنهادی موسوی و همکاران	٤/۱٦	۲۲/۹۵



شکل ١٤ مقایسهٔ درصد خطا در تغییرمکان قائم تیرهای مسلح با میلگرد CFRP

جدول ١٧ محاسبهٔ درصد خطا در تغییرمکان قائم محاسباتی و مدل‌شدهٔ تیر با میلگرد CFRP در نرم‌افزار آباکوس

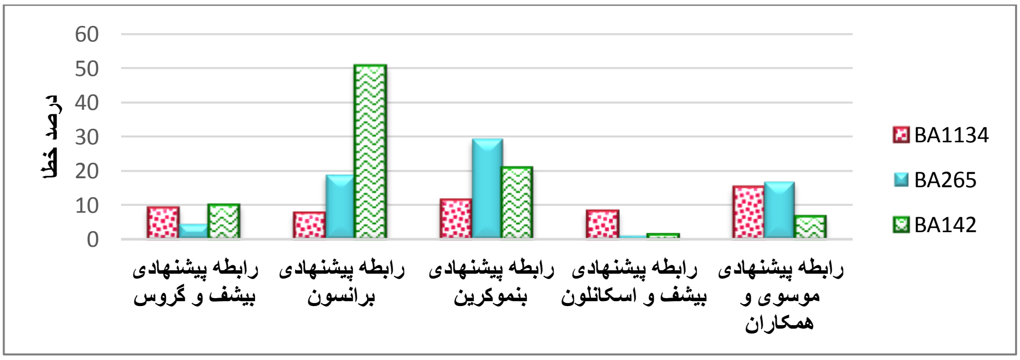
نوع تیر	فرمول مورد استفاده برای محاسبهٔ I_e	درصد خطا (e)	I_g/I_{cr}
BC1134	رابطهٔ پیشنهادی بیشُف و گروس	٣٧/٧٦	٢/٢٦
BC1134	رابطهٔ پیشنهادی برانسون	٣٦/٥٣	٢/٢٦
BC1134	رابطهٔ پیشنهادی بنموکرین و همکاران	٢٣/٧٦	٢/٢٦
BC1134	رابطهٔ پیشنهادی بیشُف و اسکانلون	٣٧/١٥	٢/٢٦
BC1134	رابطهٔ پیشنهادی موسوی و همکاران	٢٧/٥٢	٢/٢٦
BC265	رابطهٔ پیشنهادی بیشُف و گروس	٧/٠٧	٥/٣٨
BC265	رابطهٔ پیشنهادی برانسون	٩/٠٤	٥/٣٨
BC265	رابطهٔ پیشنهادی بنموکرین و همکاران	٣٥/١٥	٥/٣٨
BC265	رابطهٔ پیشنهادی بیشُف و اسکانلون	٩/٣٨	٥/٣٨
BC265	رابطهٔ پیشنهادی موسوی و همکاران	٢٧/٥	٥/٣٨
BC142	رابطهٔ پیشنهادی بیشُف و گروس	٣/٨٢	٨/٦٨
BC142	رابطهٔ پیشنهادی برانسون	٧/٠١	٨/٦٨
BC142	رابطهٔ پیشنهادی بنموکرین و همکاران	٢٥/٣٩	٨/٦٨
BC142	رابطهٔ پیشنهادی بیشُف و اسکانلون	٠/٣٤	٨/٦٨
BC142	رابطهٔ پیشنهادی موسوی و همکاران	١٩/٠٦	٨/٦٨

استفاده از رابطهٔ پیشنهادی بنموکرین در تیرهای بتنی مسلح شده با میلگرد CFRP در حالت خرد شدگی بتن کمترین درصد خطا را درمقایسه با سایر روابط نشان می‌دهد (٪٢٤ خطا).

نتایج حاصل از روابط پیشنهادی بیشُف و گروس، بیشف و اسکانلون تقریب خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد (کمتر از ٪١٠ خطا). درمورد تیرهای مسلح با میلگرد AFRP با درصد آرماتور بالا استفاده از رابطهٔ برانسون به نتایج آزمایشگاهی نزدیک‌تر می‌باشد (تقریباً ٪٧ خطا).

جدول ۱۸ محاسبهٔ درصد خطا در تغییرمکان محاسباتی و مدل‌شدهٔ تیر با میلگرد AFRP در نرم‌افزار آباکوس

نوع تیر	فرمول مورد استفاده برای محاسبه I_e	درصد خطا (e)	I_g/I_{cr}
BA1134	رابطهٔ پیشنهادی بیشُف و گروس	۹/۱۹	٤/۱۹
BA1134	رابطهٔ پیشنهادی برانسون	۷/٦	٤/۱۹
BA1134	رابطهٔ پیشنهادی بنموکرین و همکاران	۱۱/۳	٤/۱۹
BA1134	رابطهٔ پیشنهادی بیشُف و اسکانلون	۸/۲۱	٤/۱۹
BA1134	رابطهٔ پیشنهادی موسوی و همکاران	۱٥/۱۷	٤/۱۹
BA265	رابطهٔ پیشنهادی بیشُف و گروس	٤/٤۷	۱۱/۳٦
BA265	رابطهٔ پیشنهادی برانسون	۱۸/۷٦	۱۱/۳٦
BA265	رابطهٔ پیشنهادی بنموکرین و همکاران	۲۹/۳۱	۱۱/۳٦
BA265	رابطهٔ پیشنهادی بیشُف و اسکانلون	۰/۹۹	۱۱/۳٦
BA265	رابطهٔ پیشنهادی موسوی و همکاران	۱٦/۸٦	۱۱/۳٦
BA142	رابطهٔ پیشنهادی بیشُف و گروس	۱۰/۰۷	۱۸/۸٤
BA142	رابطهٔ پیشنهادی برانسون	٥۰/٥٥	۱۸/۸٤
BA142	رابطهٔ پیشنهادی بنموکرین و همکاران	۲۰/۹٥	۱۸/۸٤
BA142	رابطهٔ پیشنهادی بیشُف و اسکانلون	۱/٥۱	۱۸/۸٤
BA142	رابطهٔ پیشنهادی موسوی و همکاران	٦/۷٥	۱۸/۸٤



شکل ۱٥ مقایسهٔ درصد خطا در تغییرمکان قائم تیرهای مسلح با میلگرد AFRP

نتیجه‌گیری

در این تحقیق به‌کمک نرم‌افزار آباکوس رفتار تغییرمکان قائم در ۱۲ تیر بتن‌آرمه با میلگردهای GFRP، CFRP، AFRP و فولاد A II با نسبت‌های میلگرد ۰/۰۳۹، ۰/۰۰۸ و۰/۰۰٤ مورد بررسی قرار گرفت. از مطالعات انجام شده نتایج زیر حاصل گردید.

۱. باتوجه به نتایج حاصل از خروجی نرم‌افزار آباکوس، استفاده از میلگرد CFRP در تیرهای بتنی به‌عنوان جایگزین مناسبی برای میلگردهای فولادی در محیط‌های خورنده پیشنهاد می‌شود و درصورت استفاده از میلگردهای GFRP و AFRP در تیر بتنی، برای کاهش تغییرمکان قائم، بهتر است ترکیبی از میلگردهای فولادی و FRP استفاده شود.

۲. میلگرد GFRP به‌ازای یک نیروی یکسان بیشترین تغییرمکان و میلگرد CFRP کمترین تغییرمکان وسط دهانهٔ تیرهای بتنی مسلح‌شده با این میلگردها را دارند.

۳. در تیرهای بتن‌آرمه با میلگردهای FRP با درصدها و انواع مختلف میلگرد مشاهده شد که تا قبل از نیروی ترک‌خوردگی، تیرها دارای سختی و تغییرمکان قائم یکسانی می‌باشند و پس از آن در تیرهای بتنی با درصد آرماتور بالا تغییرمکان کمتری نسبت به تیرهای بتنی در حالت بالانس و گسیختگی میلگرد مشاهده می‌گردد.

٤. نتایج نشان می‌دهند که برای تیرهای بتن‌آرمه با میلگرد GFRP با درصد آرماتور بالا رابطهٔ پیشنهادی بیشف و گروس با درصد خطای کمتر از ۱٪ و رابطهٔ پیشنهادی بیشف و اسکانلون با درصد خطای حدود ۲٪ مناسب می‌باشد. در تیرهای بتنی مسلح با میلگرد CFRP، استفاده از روابط بنموکرین برای محاسبهٔ تغییرمکان وسط دهانهٔ تیر با درصد آرماتور بالا پیشنهاد می‌شود. در تیرهای بتن‌آرمه با میلگرد AFRP با درصد آرماتور بالا، رابطهٔ برانسون با حدود ۷٪ خطا به نتایج نزدیک‌تر می‌باشد. استفاده از رابطهٔ پیشنهادی بیشف و گروس و هم‌چنین رابطهٔ بیشف و اسکانلون در تیرهای بتنی با میلگردهای AFRP با کمتر از ۱۰٪ خطا، پیشنهاد می‌شود.

۵. روابط موجود برای تعیین ممان اینرسی مؤثر در تیرهای بتن‌آرمه با میلگردهای FRP در شرایط مختلف از دقت مناسبی برخوردار نمی‌باشند. تغییرمکان‌های حاصل از این روابط با نتایج آزمایشگاهی اختلاف دارند؛ ازاین‌رو لزوم ارائهٔ روابط دقیق‌تری برای تعیین تغییرمکان قائم در این تیرها ضروری به‌نظر می‌رسد.

مراجع

۱. موسوی، ر.، اصفهانی، م.، رخشانی مهر، م.، «ممان اینرسی مؤثر تیرهای مسلح‌شده با میلگردهای FRP»، نشریهٔ مهندسی عمران فردوسی، دورهٔ ۲٤، ش. ۲، صص. ۸۵–۱۰٤، (۱۳۹۲).

۲. ذبیح‌الهی، ح.، «بررسی رفتار خمشی و برشی پل‌های جعبه‌ای بااستفاده از بتن خودمتراکم مقاومت بالا (SCC) و میلگردهای FRP»، پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد سازه، گروه مهندسی عمران، مجتمع آموزش عالی فنی و مهندسی نوشیروانی، دانشگاه مازندران، (۱۳۸۹).

3. Japan Society of Civil Engineers (JSCE), "Standard Specifications for Concrete Structures: Design. JSCE Guidelines for Concrete", Tokyo, No. 15, (2007).

4. Imjai, T., Guadagnini, M., Garcia, R. and Pilakoutas, K., "A Practical Method for Determining Shear Crack Induced Deformation in FRP RC Beams", Engineering Structures, Vol. 126, Pp. 353-364, (2016).

5. Timinskas, E., Jakstaitė, R., Gribniak, V., Tamulėnas, V. and Kaklauskas, G., "Accuracy Analysis of Design Methods for Concrete Beams Reinforced with Fiber Reinforced Polymer Bars", Engineering Structures and Technologies, Vol. 5, No. 3, Pp. 123-133, (2013).

6. Al-Sunna, R., Pilakoutas, K., Hajirasouliha, I. and Guadagnini, M., "Deflection Behavior of FRP Reinforced Concrete Beams and Slabs: An Experimental Investigation", Composites Part B: Engineering, Vol. 43, No. 5, Pp. 2125-2134, (2012).

7. Fan, X. and Zhang, M., "Experimental Study on Flexural Behavior of Inorganic Polymer Concrete Beams Reinforced with Basalt Rebar", Composites Part B: Engineering, Vol. 93, Pp. 174-183, (2016).

8. Hong, Z., Zhiqiang, D., Gang, W. and Zhishen, W., "Experimental Study and Theoretical cCalculation on the Flexural Stiffness of Concrete Beams Reinforced with FRP Bars", *China Civil Engineering*

Journal, No. 11, (2015).

9. Goldston, M. W., Remennikov, A. and Sheikh, M. N., "Flexural Behavior of GFRP Reinforced High Strength and Ultra-high Strength Concrete Beams", Construction and Building Materials, Vol. 131, Pp. 606-617, (2017).
10. American Concrete Institute (ACI), "Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars", ACI 440.1 R., ACI Committee, Farmington Hills, Michigan, (2015).
11. Canadian Standards Association (CSA), "Design and Construction of Building Structures with Fiber-reinforced Polymers", American Concrete Institute, Ontario, Canada, (2012).
12. American Concrete Institute (ACI), "Building Code Requirements for Structural Concrete", ACI 318M-11, ACI Committee 318, Farmington Hills, Michigan, (2011).
13. Branson, D. E., "Instantaneous and Time-dependent Deflections of Simple and Continuous Reinforced Concrete Beams", HPR Report No. 7, Part 1, Alabama Highway Department, Bureau of Public Roads, Montgomery, (1965).
14. Kheyroddin, A., Mirza, M. S., "Flexural Rigidity of Reinforced Concrete Beams", In Canadian Society for Civil Engineering Annual Conference Proceedings, Pp. 363-372, (1995).
15. Kheyroddin, A., "Nonlinear Finite Element Analysis of Flexure-dominant Reinforced Concrete Structures", Ph.D. Thesis, Dept. of Civil Eng. And Applied Mechanics, McGill University, Canada, (1996).
16. Bischoff, P. H., "Reevaluation of Deflection Prediction for Concrete Beams Reinforced with Steel and Fiber Reinforced Polymer Bars", *Journal of Structural Engineering,* Vol. 131, No. 5, Pp. 752-767, (2005).
17. Benmokrane, B., Chaallal, O. and Masmoudi, R., "Flexural Response of Concrete Beams Reinforced with FRP Reinforcing Bars", *ACI Structural Journal,* Vol. 93, No. 1, Pp. 46-55, (1996).
18. Bischoff, P. H., Scanlon, A., "Effective Moment of Inertia for Calculating Deflections of Concrete Members Containing Steel Reinforcement and Fiber-reinforced Polymer Reinforcement", *ACI Structural Journal,* Vol. 104, No. 1, P. 68, (2007).
19. Bischoff, P. H., Gross, S. P. and Ospina, C. E., "The Story behind the Proposed ACI 440 Changes for Prediction of Deflections in Reinforced Concrete", American Concrete Institute, Michigan, Pp. 53-76, (2009).
20. Bischoff, P. H. and Gross, S. P. "Equivalent Moment of Inertia Based on Integration of Curvature", *Journal of Composites for Construction*, Vol. 15, No. 3, Pp. 263-273, (2010).
21. Bischoff, P. H., "Deflection Calculation of FRP Reinforced Concrete Beams Based on Modifications to the Existing Branson Equation", *Journal of Composites for Construction,* Vol. 11, No. 1, Pp. 4-14, (2007).

22. Bischoff, P. H. and Johnson, R. D., "Effect of Shrinkage on Short-term Deflections of Reinforced Concrete Beams and Slabs", *ACI Structural Journal*, Vol. 105, No. 4, Pp. 516-518, (2008).
23. American Concrete Institute (ACI), "Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary", ACI 318R-08, ACI Committee 318, Farmington Hills, Michigan, (2008).
24. Nilforoush, R. and Esfahani, M. S., "Numerical Evaluation of Structural Behavior of the Simply Supported FRP-RC Beams", (2012).